



рис.2 Восприимчивость ферроэлектрической подсистемы в зависимости от температуры и магнитного поля при $L = 16$ и обменными параметрами $J_m = -1$, $J_f = 1$, $J_{mf} = 0.5$.

На рис.1 изображен график зависимости восприимчивости спиновой подсистемы от температуры и магнитного поля, на котором наблюдаются фазовые переходы при отрицательном и положительном значении магнитного поля. Во втором случае пик восприимчивости приходится на значение температуры 2.3 в энергетических единицах.

График зависимости восприимчивости ферроэлектрической подсистемы от температуры и магнитного поля представлен на рис.2. Фазовый переход при температуре 7, наблюдается лишь в положительной области значений магнитного поля, что обусловлено особенностями модели кристаллической решетки и значениями обменных параметров.

В результате нами определены: основное состояние пленки мультиферроика с орторомбической симметрией спиновых и ферроэлектрических подсистем, а также полевые и температурные зависимости энергетического спектра, намагниченностей, теплоемкостей и восприимчивостей. Наблюдаются различные типы фазовых переходов для обоих параметров порядка, при J_{mf} от 0.2 до 0.5 фазовые переходы для обоих параметров порядка происходят в практически в одном и том же температурном диапазоне.

Список публикаций:

- [1] Binder K., Luijten E. // *Physics reports* 344. 2001. p. 361-364
- [2] Diep H. T., Bocchetti V., Hoang D. T., Ngo V. T. // *Phys.:Conf. Series* 537. 2014. 012001
- [3] Шарафуллин И. Ф., Кызыргулов И. Р., Тавлыкаев Р. Ф. // *Вестник БашГУ*. 2014. Т. 19, № 2, С. 390-394
- [4] Kharrasov M. K., Kyzrgulov I. R., Sharafullin I. F. et. al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 80. 2016. p. 695

Синтез и магнитные свойства трехслойных пленок CoNi/Si/FeNi

Живая Яна Александровна

Сибирский федеральный университет

Патрин Геннадий Семенович, д.ф.-м.н.

zhivaya.yana@mail.ru

Пленочные системы, состоящие из чередующихся слоев магнитомягкого и магнито жесткого материалов, являются подходящими объектами для использования в устройствах спиновой электроники. Межслоевое взаимодействие в таких системах является ответственным за формирование магнитного состояния. В случае, когда имеет место сопряжение ферромагнитного и антиферромагнитного слоев, как правило реализуется эффект обменного смещения и весь наблюдаемый процесс намагничивания связан с поведением ферромагнитного слоя [1]. Когда сопрягаются ферромагнитные магнитомягкий и магнито жесткий слои может возникать новое состояние, типа «магнитной пружины». В этом случае процесс намагничивания проходит через определенные стадии, и петля гистерезиса имеет характерную форму [2]. Изначально такие системы изучались в связи с исследованием многокомпонентных постоянных магнитов [3]. Затем были изучены особенности намагничивания слоисто-неоднородных структур в зависимости от толщины магнитомягкого и магнито жесткого слоев, межслоевого взаимодействия и анизотропии слоев [4]. Однако в случае, когда межслоевое взаимодействие является регулируемым, есть основание ожидать новых проявлений, что может иметь практическое значение. В работе [5] приведены результаты исследований многослойных структур (системы Co-P) магнито жесткий/магнитомягкий материалы (с количеством блоков до 40) с эффектом магнитной пружины, где в качестве промежуточного слоя использовался немагнитный слой аморфного NiP.

Методом ионно-плазменного распыления впервые синтезированы пленки композиции CoNi/Si/FeNi (базовый вакуум составлял $10^{-6} - 10^{-7}$ Тор.). Содержания никеля в слое CoNi составляло 19.5 ат. %, а в слое FeNi

было 83 ат. %. Толщина магнито жесткого слоя (CoNi) оставляет $t_h = 53$ nm, а толщина магнитомягкого слоя (FeNi) $t_s = 72$ nm для всех пленок. Толщина немагнитного полупроводникового слоя была переменной и менялась в диапазоне $t_{Si} = 0 - 15$ nm. Измерения намагниченности проводились на установке MPMS-XL и на магнитооптической установке NanoMOKE-2 в диапазоне температур от гелиевых до комнатной. Электронно-микроскопические исследования (режим cross-section) показали наличие резкой границы раздела между слоем кремния и обоими магнитными слоями. Также было получено, что пленка CoNi была поликристаллической и находилась в гексагональной фазе.

Магнитные измерения показали, что в данной системе отношение коэрцитивных сил отдельных магнито жесткого (CoNi) и магнитомягкого (FeNi) слоев составляет более 2^3 порядков. Ситуация заметно меняется, когда из этих слоев складывается сэндвич. В этом случае имеем, что кривая намагничивания имеет вид наложения двух петель. Однако, это не алгебраическая сумма исходных кривых. Внутренняя петля уширена по сравнению с исходной магнитомягкой кривой, а внешняя кривая заметно сужена. Введение немагнитной полупроводниковой прослойки кремния делает ситуацию еще более необычной. В зависимости от толщины немагнитной прослойки форма кривой намагничивания заметно меняется. По крайней мере, отчетливо видно, что коэрцитивная сила зависит от толщины кремния осциллирующим образом. Обращает на себя внимание и то, что высота высококопелевой ступеньки зависит от толщины кремниевой прослойки.

Обнаружено, что на температурной зависимости коэрцитивной силы в низкотемпературной её части ($T \sim 5$ K) наблюдается наличие максимума, однако, чтобы объяснить эти данные одной только конкуренции анизотропий в разных слоях явно недостаточно. Это дает основание считать, что межслоевой обмен зависит от толщины немагнитного слоя, и он существенно влияет на формирование магнитного состояния.

Список публикаций:

- [1]. J. Nogues, J. Sort, V. Langlais, et al, *Phys. Rep.* V.422, 65 (2005).
- [2]. S.D. Bader. *Rev. Mod. Phys.* V.78, 1 (2006).
- [3]. J.P. Liu. *Exchange-Coupled Nanocomposite Magnets*. In book: *Nanoscale Magnetic Materials and Applications*. Ed. by: J.P. Liu, et al. (Springer, New York, 2009), P.309.
- [4]. D. Suess. *JMMM*. V.308, 183 (2007).
- [5]. G.S. Patrin, Ya. Shiyun, K.G. Patrin, G.Yu. Yurkin. *J. Low Temp. Phys.* V.182, 73 (2016).

Исследование фазовых состояний углерода в материале, полученном в условиях электрического взрыва смеси графита с катализаторами

Игнатьев Виталий Андреевич

Мельникова Нина Владимировна, Аликин Денис Олегович

Уральский федеральный университет

Мельникова Нина Владимировна, к.ф.-м.н.

Faust.93@mail.ru

Наноалмазные частицы обладают уникальными физико-химическими характеристиками, в связи с чем выявление влияния способов их получения на физические свойства является актуальной задачей. Цель работы — исследование фазовых состояний углерода и установление наличия алмазоподобного углерода в ультрадисперсном материале, полученном в условиях электрического взрыва смеси графита с катализаторами.

Образцы для исследований, представляющие собой осажденные на стеклянные подложки продукты электрического взрыва медных трубочек, наполненных графитом с катализаторами Ni-Mn, получены в институте сильноточной электроники СО РАН (Томск) по методике, представленной в работе [1]. Для исследования образцов использованы методы изучения: оптическая, растровая электронная и конфокальная рамановская микроскопии.

С помощью оптической микроскопии получены изображения поверхностей образцов. Растровая электронная микроскопия позволила определить содержание химических элементов в весовых и атомных процентах и установить наличие углерода в алмазоподобной форме - агломератов различных размеров, попадающих в диапазон от 20 до 95 нм. Средний размер агломератов 55 нм. С помощью рамановской спектроскопии получены спектры комбинационного рассеяния. На рамановских спектрах, представленных на рисунке 1, полученных на двух разных участках образца, на спектре 1 максимумы интенсивности при 940 см^{-1} и 1100 см^{-1} соответствуют наиболее сильным полосам от стеклянной подложки (SiO_2). Полоса 1332 см^{-1} на том же спектре соответствует линии углерода в форме алмаза (1332 см^{-1}) [2], а наличие полосы 1582 см^{-1} и гало в области $2000-4000\text{ см}^{-1}$ на спектре 2 могут указывать на присутствие углерода в форме графита и аморфного углерода.